

# 基于 Round-Robin 方法的星载光交换混合门限 组装算法研究

李瑞欣 赵尚弘 李勇军 张晓燕 康巧燕

(中国人民解放军空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 根据卫星光交换网络的高带宽、低丢包率和高链路利用率应用需求,结合现有的地面光交换组装算法,提出了一种新的基于混合门限和轮询方式的星载光交换组装算法。算法首先按照优先级缓存分组,再按照混合门限和轮询方式组装 IP 分组,减少突发数据包的空闲率,提高了链路利用率。理论分析与仿真证明该算法计算复杂度与轮询方式相同,突发数据包空闲率低于  $10^{-4}$ ,丢包率在负载为 0.5 时平均达到  $10^{-6}$ ,适用于星载光交换系统。

**关键词** 大气光学;卫星光网络;星载光交换;混合门限;轮询方式;组装算法

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.030102

## Research of On-Board Optical Switching Assembly Algorithm Based on Mixed Threshold and Round-Robin Scheme

Li Ruixin Zhao Shanghong Li Yongjun Zhang Xiaoyan Kang Qiaoyan

(Information and Aviation School, Air Force Engineering University of the People's Liberation Army,  
Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract** According to the high bandwidth, low packet-loss ratio, high channel utility requirements of satellite optical switching network, an on-board assembly algorithm based on mixed threshold and round-robin scheme is proposed combining the ground optical assembly algorithm. The algorithm caches the IP packet according to the parity, and assembles the packet according to the mixed threshold and round-robin scheme. Through the scheme, the padding ratio of burst is lowered. From the results of analysis and emulation, it is found that the complexity is the same as that of the round-robin method; the padding ratio of burst data packer is less than  $10^{-4}$  when the load is 0.65, and the packet loss rate is  $10^{-6}$  when the load is 0.5. This algorithm meets the requirements of optical satellite communications.

**Key words** atmospheric optics; satellite optical network; on-board optical switching; mixed threshold; round-robin scheme; assembly algorithm

**OCIS codes** 010.1290; 060.2605; 060.4250; 060.6719

## 1 引言

目前卫星光网络使用光信号作为传输介质,但其交换节点仍然使用 ATM/IP 等电交换方式<sup>[1,2]</sup>,由于电子瓶颈、大带宽时延积以及电交换设备的体积和重量等不利因素,限制了下一代卫星网络的发展及其速率的提升,所以探索新的星上交换技术是卫星网络发展的必然趋势。国内外研究表明,光交换技术是替代电交换的最佳途径,可以充分利用激光低损耗、大带宽以及激光设备重量轻、体积小的优势<sup>[3]</sup>。欧空局(ESA)在 Darwin Mission 和 XEUS 项目中研制了无阻塞  $8 \times 8$  星载光交换机,实验证明性能良好<sup>[4]</sup>,从而也证明了星

收稿日期: 2012-11-14; 收到修改稿日期: 2012-12-31; 网络出版日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61201209)和陕西省自然科学基金(2010JM8014)资助课题。

作者简介: 李瑞欣(1973—),女,博士研究生,主要从事天基信息系统和星上交换技术方面的研究。

E-mail: sunflowerlrx@sina.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信技术方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

载光交换是可行的。除此之外,国际空间站激光通信终端把电子信息组装成光数据包时采用了 SONET 标准<sup>[5]</sup>,数据速率达到了 2.5 Gb/s。国内有文献提出借鉴光突发交换(OBS)作为卫星光网络星载光交换的方式<sup>[6]</sup>,其原理是以低轨道(LEO)卫星作为边缘节点,高轨道(GEO)通信卫星作为核心节点。边缘节点把数据分组和控制分组独立传送,在时间上和信道上分离。它采用单向资源预留机制,以光突发作为最小的交换单元。控制包提前发送进行资源预留,突发数据包等待一段时间后再沿着预留好的路线发送出去,核心节点根据控制信息对突发数据包进行光域交换,不再进行光/电转换。这种方法的主要出发点是考虑到光交换的可实现性以及和地面网络的互联互通问题,但是该文献只是提出了一种实现设想,并没有给出具体的组装方法。本文就是依据此设想来研究卫星光网络的交换组装算法的。

在 OBS 网络中,把 IP 包组装成大粒度的数据突发包是其中一项关键技术,在卫星光网络中仍然面临这个问题。针对地面网络已经提出了很多的组装算法,但这些算法不是针对卫星光网络设计的,在填充率和信道利用率、算法复杂度等方面还不能满足卫星光通信的需求,所以有必要依据特殊需求提出新的组装算法。

星载光交换组装算法设计时主要考虑的问题有:1) 业务种类多,服务质量(QoS)要求不一致。有的业务对时延敏感,有的对丢包率敏感,针对这些需求,在设计系统时需要系统地、折中地考虑交换和调度方法。2) 星上资源有限,算法复杂度不能太高,否则会耗费大量能源,导致卫星寿命降低。3) 通信时间受限,对通信链路的利用率要求较高<sup>[7]</sup>。卫星光网络的通信时间由于受到卫星间相对运动的影响不能随时建立连接,通信时间受到一定的限制,且卫星间距离遥远,通信质量受到影响,这就对通信期间光链路的利用率提出了较高的要求。4) 光纤缓存器缓存时间有限,且单位长度重量较大,性能有限<sup>[8]</sup>,故星上不可能携带大量光纤缓存器。

现有的地面光突发组装算法主要有基于固定长度门限、基于固定时间门限以及混合门限的组装算法等几种。基于固定长度门限的组装算法<sup>[9]</sup>的优点在于算法简单,容易实现;缺点在于当网络的负载比较小时,将导致组装所需的时间较长,会极大底增加 IP 分组的端到端延时或增加网络的控制开销。基于固定时间门限的算法<sup>[10]</sup>的特点是突发周期性产生,其所含的 IP 分组数量不确定,但是可以支持时延敏感业务,保证一定的时延要求。混合门限突发组装方法<sup>[11]</sup>基于两种门限,不论是长度或是定时哪个门限到达都触发一个突发包的生成,相比前面两种算法性能有所提高,但其两种缺点仍然存在。

除此之外,Tachibana 等<sup>[12]</sup>提出了使用 Round-robin(轮询)方法来进行不同等级数据包组装的算法,该算法简单易行,但是在低负载时信道利用率较低。文献[13]提出了一种将高等级包和低等级包混合组成定长突发包的算法来满足网络对 QoS 的要求,但是该算法在组装时每种等级的 IP 包都携带自己的组装信息,这样也导致了信道利用率的下降。再者,它是完全按照轮询的方式来组装每一等级的 IP 包的,若其中某段时间某个等级没有数据包需要发送,则其信道利用率就会更低。文献[14]提出了降低填充开销的组装算法(PRBA)算法,该算法在降低突发包的填充率方面取得了较好的效果,提高了系统的利用率;但是由于控制包和数据突发包产生的不一致性也导致了控制包中的长度信息不够准确,这样在进行资源预留时可能会产生两种情况:1) 若按照最大长度突发门限来预留则可能链路利用率不高,导致资源浪费,从而使其他突发数据包得不到应得资源,导致其它数据突发包丢包率的上升;2) 若按照控制包产生时的数据突发包的长度来进行资源预留,则会导致预留的资源不能满足真正组装后的突发包的交换要求,这样丢包率也会上升。

另外,学者们提出了各种自适应算法<sup>[15~19]</sup>,基本原理是根据对网络流量的预测或链路的丢包率级别决定汇聚算法的阈值,从而达到较好的性能。相比固定门限算法,自适应算法性能得到了提高,但是其实现的复杂性很高,不适合星载光交换系统。

针对这些不足,在借鉴前人研究成果的基础上,对地面光网络交换组装算法进行了改进,设计了一种基于混合门限和 Round-robin 方法的星载光交换组装算法,实现了星载光交换,并对算法进行了理论和仿真分析。结果表明该算法能够满足卫星通信业务需求,且计算复杂度低,链路利用率较高,丢包率达到了业务要求,适用于星载光交换机。

## 2 基于 Round-robin 方法的混合门限星载光交换组装算法

结合卫星光网络的特点和各种组装算法的优点,对基于 Round-robin 的组装算法进行了改进:LEO(相

当于边缘节点)把来自各个传感器的数据分别按照数据的优先级(基于 QoS)和目的地址存储到不同的缓存中,每个缓存队列都配置一个组装器,如图 1 所示。

组装步骤如下:1) 每个组装器首先填入自己队列中的数据。2) 如果组装时间  $T_{\min}$ (组装时间下限)到了仍然填不满最短突发长度  $L_{\min}$ ,则按照异步的方式进行轮询和混合组装,即若高优先级 IP 包在  $T_{\min}$  内填不满一个最短突发包  $L_{\min}$ ,才填入低优先级队列中的数据,直到达到最大突发包长度  $L_{\max}$ 或达到时间门限的最大值  $T_{\max}$ ;在轮询期间,每个队列不相互等待,本队列只要满足组装条件,即可产生一个突发包。3) 若高优先级 IP 包在一定时间内能够填满,则此突发包只传输高优先级数据,否则突发包中是混合数据。4) 若在  $T_{\max}$  到达时且低优先级数据填入后仍然不能填满突发包,则填入空闲数据。

突发包中的各种优先级数据的长度由控制包中的长度字段标出。假设有  $N$  个优先级,则控制包中的长度字段至少为  $N-1$  个,这样在目的端才可以区分出不同的 IP 包。高优先级组装器从低优先级缓存队列的队头拿数据进行填充。可以看出,低优先级数据相当于“搭顺路车”,既减少了组装等待时间,同时也提高了星间光链路的利用率。

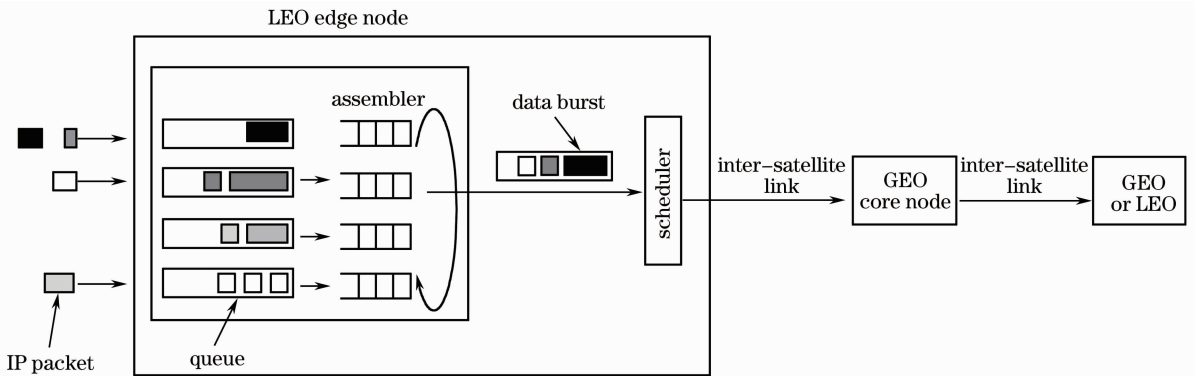


图 1 星载光交换网络边缘节点的组成结构及传输链路

Fig. 1 Edge node structure and transmission link of on-board optical switching network

### 3 算法理论模型

#### 3.1 空闲比特填充率

将本文得出的算法命名为 FZTFR 算法。为进一步了解 FZTFR 算法的性能,给出一个近似数学分析来计算空闲比特的填充概率。为便于分析,假定系统有  $N$  个权限类别的突发包,目的地址有  $P$  个,边缘节点有  $NP$  个缓存队列,则可把边缘节点队列看作是一个  $MM-NP-L$  排队系统,此处  $M$  表示节点的服务时间满足指数分布, $NP$  表示系统中服务员的个数,即组装器的个数, $L$  表示系统的容量,即突发包的最大长度。

假设类别 1 拥有最高的权限,而类别  $N$  拥有最低权限。任一类别  $i$  的突发包单独到达时的指数分布率为  $\lambda_i$ ,它的平均传输时间为  $t_i$ ,因此类别  $i$  突发包的流量密度为  $\rho_i = \lambda_i t_i / K$ , $K$  为用于传输突发数据包的波长数目。IP 数据包的服务时间服从参数为  $\mu$  的指数分布。

假设突发组装长度门限下限为  $L_{\min}$ ,上限为  $L_{\max}$ ,组装时间的门限分别为  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$ ,则在  $T_{\min}$  时间内到

达  $k$  个分组的概率为  $P(N = k) = \frac{(\lambda T_{\min})^k}{k!} \exp(-\lambda T_{\min})$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,在  $T_{\min}$  时间内组装器 IP 分组队列

长度  $B$  的概率密度函数为  $f_B(x) = \sum_{k=0}^{\infty} P(N = k) f(x|k)$ ,其中  $f(x|k)$  为有  $k$  个分组时到达队列长度的条件概率。由于 IP 分组长服从负指数分布, $k$  个分组到达队列时队列长度为一个  $k$  阶爱尔兰分布,则  $f(x|k)$  可由下式给出<sup>[15]</sup>:

$$f(x|k) = \frac{\mu(\mu x)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu x), \quad (1)$$

从而可得  $T_{\min}$  时间内 IP 分组队列长度  $B$  的概率密度函数为

$$f_B(x) = \sum_{k=0}^{\infty} P(N=k) f(x|k) = \frac{(\lambda T_{\min})^k}{k!} \exp(-\lambda T_{\min}) \frac{\mu(\mu x)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu x). \quad (2)$$

若高等级 IP 包不能在时间门下限  $T_{\min}$  到来时达到最短突发包长,则会从低等级队列中拿出一些数据填入,使之能达到最短突发门限长度。这些低等级数据也是在  $T_{\min}$  时间内到达的,则在  $T_{\min}$  时间内可能到达  $(L_{\min}-k)$  个低等级分组的概率为

$$P(N=L_{\min}-k) = \frac{(\lambda T_{\min})^{L_{\min}-k}}{(L_{\min}-k)!} \exp(-\lambda T_{\min}), \quad (3)$$

在时间  $T$  内填满突发包最短包长的概率为

$$P(N=L_{\min}) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T) \cdot \frac{(\lambda T)}{(L_{\min}-k)!} \exp(-\lambda T) = \frac{(\lambda T)^{L_{\min}}}{(L_{\min}-k)!k!} \exp(-2\lambda T). \quad (4)$$

系统的空闲填充率可以通过下式计算:

$$P_{pd} = \int_0^{L_{\min}-1} f_B(x) dx. \quad (5)$$

$f_B(x)$  可以用一个  $n$  阶一般爱尔兰分布来近似,表达式为

$$f_B(x) = \frac{\mu_1(\mu_1 x)^n}{n!} \exp(-\mu_1 x), \quad (6)$$

式中  $n = \lceil 1/cv^2 \rceil$ ,  $p = \frac{1 - (2ncv^2 + n - 2 - \sqrt{n^2 + 4 - 4ncv^2})}{2(n-1)(cv^2 + 1)}$ ,  $\mu_1 = (1 - p + np)/m_1$ 。

通过以上公式,就可以计算出突发包的空闲比特填充率。

### 3.2 链路利用率

在考虑保护时间的条件下,星载光交换网络总的链路利用率为

$$\eta_{\text{total}} = \frac{K-k}{K} \cdot \frac{T_{\text{bs}}}{T_{\text{bs}} + T_{\text{oxc}}} \cdot \rho_b, \quad (7)$$

式中  $T_{\text{bs}}$  为数据突发传输时间,  $T_{\text{oxc}}$  为设备倒换时间,  $\rho_b$  为单波长信道的业务量强度。从(7)式可以看出,在选取组装算法参数时,为保证较高的链路利用率,必经使  $\frac{T_{\text{bs}}}{T_{\text{bs}} + T_{\text{oxc}}}$  足够大,即突发传输时间与倒换时间相比要足够大。因此,要求时间门限和长度门限满足以下条件<sup>[14]</sup>:

$$T_{\text{th}} \geq \frac{\eta Q D T_{\text{oxc}}}{\lambda(1-\eta)}, L_{\text{th}} \geq \frac{T_{\text{oxc}} \mu \eta + \eta - 1}{\mu(1-\eta)}, \quad (8)$$

式中  $Q$  为系统的 QoS 等级数,  $D$  为目的地址数,  $\lambda$  为 IP 分组以泊松过程到达时的参数,  $1/\mu$  为 IP 分组长度的平均值,  $\eta = \frac{T_{\text{bs}}}{T_{\text{bs}} + T_{\text{oxc}}}$ 。此处  $T_{\text{bs}} = T_{\text{ass}} + T_{\text{sch}} + T_{\text{tri}} + T_{\text{del}}$ , 其中  $T_{\text{ass}}$  为边缘节点的组装时间,  $T_{\text{sch}}$  为调度时间,  $T_{\text{tri}}$  为链路传输时间,  $T_{\text{del}}$  为总的等待时延(包括组装时延、调度时延和交换时延等)。假定  $T_{\text{oxc}}$ 、 $T_{\text{sch}}$ 、 $T_{\text{tri}}$ 、 $T_{\text{del}}$  为固定值,则知当采用 FZTFR 算法时,组装时间一定比  $T_{\min}$  要大,尤其在低负载率情况下比使用固定门限算法的组装时间要长,所以其链路利用率有了较大的提高。

### 3.3 突发包丢失率

当类别  $n$  的突发包被其他类别  $n$  的突发包阻塞而不是被比它权限低的突发包阻塞时,就得到了最低的突发包丢失率。类别  $n$  突发包的最低丢失率可表示为

$$P_n \geq B(K, \rho_i) = \frac{\rho_n^k / k!}{\sum_{k=0}^K \rho_n^k / k!}. \quad (9)$$

### 3.4 算法复杂度

本组装算法在最好的情况下,即在网络负荷较大时,某一队列中的数据已可以在最短时间内填满最短长度的突发包,不需要填充入别的队列的数据,此时算法的复杂度比 Round-robin 轮询算法还要简单,所需的存储空间也没有增加;在最坏情况下,即某一队列的数据很少,在最短时间内门限到来时仍不能填满最短突发包长,此时在  $T_{\max} - T_{\min}$  内轮询其他队列,插入其他队列的数据包,此时的复杂度与 Round-robin 轮询算法相

当。所以 FZTFR 算法是简单可行且易于实现的,较为适合星载光交换网络。

## 4 系统仿真

模拟仿真中假设单波长信道速率为 10 Gb/s,数据波长数为 8 个,控制波长数为 2 个。IP 分组以泊松方式到达,平均长度为 1250 byte,平均到达速率为  $\lambda=1/\mu=1.0$ ,  $\mu=1.0$ 。具有 2 个优先级突发包,分别为 0, 1。假设核心节点使用 LAUC 调度算法,不具有光缓存和波长转换能力。6 个边缘节点,2 个核心节点,目的地址在边缘节点之间均匀分布,共有 15 个缓存队列。假设最短汇聚时间为  $80 \mu\text{s}$ ,最长汇聚时间为  $100 \mu\text{s}$ ;最短汇聚突发包长度为 20000 byte,最长汇聚突发包长度为 50000 byte。偏置时间固定为  $10 \mu\text{s}$ 。

在相同的条件下使用不同的方法进行了仿真。图 2 显示了不同组装算法下的空闲比特填充率比较,可以看出:FZTFR 算法相比 PRBA 算法,填充率在高负载情况下相差不大,而在中低负载下填充率降低较多。这也证明了 FZTFR 算法对降低填充率有很明显的作用。

图 3 比较了 FZTFR 算法与其他算法的丢包率,可以看出由于采用了先进的轮询填充手段,低优先级的数据可以“搭乘”高优先级数据的“车”,这样在分配数据信道时,可以有优先权,丢包率也得到了较大的提高。

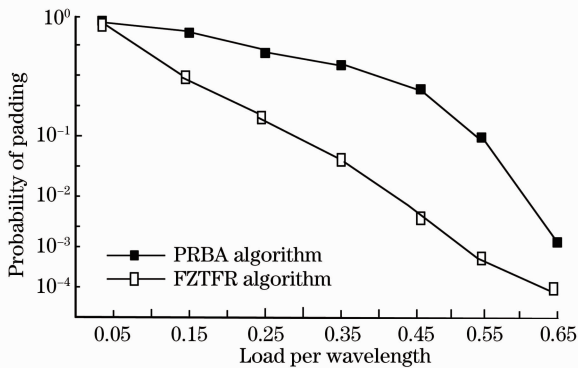


图 2 不同组装算法下的空闲比特填充率比较

Fig. 2 Comparison of idle-bit padding ratio under the different assembly algorithm

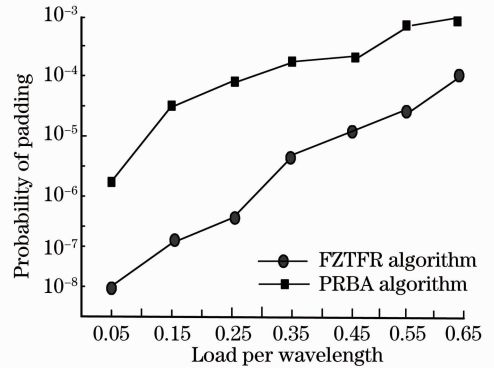


图 3 不同组装算法下的类别 1 丢包率比较

Fig. 3 Comparison of category-1 packet loss ratio under the different assembly algorithms

## 5 结 论

综合以上分析,可以得出以下结论:1) FZTFR 算法有效地降低了突发包的空闲比特填充率,提高了卫星光交换网络链路的利用率。2) 相比 Round-robin 和 PRBA 算法,FZTFR 算法突发包丢包率也得到了改善,而计算复杂度并没有因此增加。因此,FZTFR 算法达到了卫星光网络通信的需求。不足之处是如果在低优先级的队列快达到组装门限时,而高优先级的数据包恰好缺少几个 IP 包,希望从中“取走”几个时,存在着能否取出的问题,即低优先级队列中的数据在达到多长时可以被取出,这是一个值得研究的问题,强行取出可能会得不偿失,反而导致低优先级数据时延加大,链路利用率降低。

## 参 考 文 献

- Zhang Zhongya. On-board switching technology of communication satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2003, **12**(1): 6~11
- 张中亚. 通信卫星上信息交换技术[J]. *航天器工程*, 2003, **12**(1): 6~11
- J. Gilderson, J. Cherkaoui. On board switching for ATM via satellite[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1997, **35**(7): 66~70
- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 1~18
- 刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 1~18
- Bruce Battrick. The Telecommunications long-term plans; 2006~2010 [EB/OL] <http://www.esa.org>.

- 5 S. Lee, J. W. Alexander, M. Jeganathan *et al.*. Pointing and tracking subsystem design for optical communications links between the international space station and ground[C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 150~157
- 6 Li Ruixin, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi. Research of on-board mixed optical/electric switching of GEO broadband multimedia satellite[C]. Proc. ICWMMN, 2011, 22~25
- 7 Li Tiansong, Yuan Weichao, Yi Miao *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse position modulation satellite optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 26~30  
李天松, 袁伟超, 易 森 等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 26~30
- 8 Wu Chongqin. Study on fiber-delay-line-based buffer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900116  
吴重庆. 光纤延迟线型全光缓存器的研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900116
- 9 S. Oh, M. Kang. A burst assembly algorithm in optical burst switching networks[C]. OFC 2002, 2002. 771~773
- 10 A. Ge, Egat F. Call, L. Tamil. On optical burst switching and self-similar traffic[J]. *IEEE Communication Letters*, 2000, **4**(3): 98~100
- 11 B. Kantarci, G. S. Oktu, T. Atmaca. Performance of optical burst switching techniques under self-similar and Poisson traffic based on various burst assembly techniques[J]. *Computer Communication*, 2006, **30**(2): 315~325
- 12 Takuji Tachibana, Tomoya Ajima, Shoji Kasahara. Round-robin burst assembly and constant transmission scheduling for optical burst switching networks[C]. Proc. GIOBECOM 2003, 2003. 2772~2776
- 13 Zhang Zhizhong, Luo Jiangtao, Zeng Qingji. Hybrid assembly and improved head-dropping scheme for service differentiation in optical burst switching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1200~1203  
张治中, 雒江涛, 曾庆济 等. 光突发交换中支持区分业务的混合封装和改进的头部丢弃策略[J]. 光子学报, 2004, **33**(10): 1200~1203
- 14 Liu Jianping, Wen Aijun, Liu Zengji. A burst assembly algorithm with padding reduction in optical burst switching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(s): 1~4  
刘建平, 文爱军, 刘增基. 一种光突发交换网络中降低填充开销的突发组装算法[J]. 光子学报, 2007, **36**(s): 1~4